



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**IDENTIFIKACE TEPLITNÍHO MODELU VŘETENE FRÉZKY**

MILLING SPINDLE THERMAL MODEL

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ondřej Chlapek

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Petr Hadraba

**BRNO 2020**

# Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky  
Student: **Ondřej Chlapek**  
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: Mechatronika  
Vedoucí práce: **Ing. Petr Hadraba**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Identifikace teplotního modelu vřetene frézky

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student provede rešerši v oblasti vřeten obráběcích strojů a základů modelování tepelných procesů elektrických strojů. Na základě naměřených provozních dat frézky vytvoří zjednodušený teplotní model, který prováže mechanické zatížení stroje s jeho oteplením.

### Cíle bakalářské práce:

Rešerše vřeten obráběcích strojů.

Základní seznámení s tepelnými procesy v elektrických strojích.

Vytvoření zjednodušeného teplotního modelu vřetene.

### Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.

BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. 2. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1991.

ONDRUŠKA, Emil a Antonín MALOUŠEK. Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.

VLACH, Radek. Chlazení elektrických strojů. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické, 2004. ISBN 80-214-2848-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Cílem této práce je vytvoření dvou teplotních modelů (typu black box a grey box), které by umožňovaly predikovat vývoj teploty vřetene frézky, na základě naměřených provozních dat. Statistickými metodami byla určena přesnost obou vytvořených modelů, a modely byly mezi sebou porovnány.

## **Abstract**

The aim of this thesis is to create two thermal models (black box and grey box), which would allow to predict the development of the milling spindle temperature, based on measured operating data. The accuracy of both created models was determined by statistical methods, and the models were compared with each other.

## **Klíčová slova**

Vřeteno frézky, Obráběcí stroje, Teplotní model, Black box, Grey box, Predikce vývoje teploty, Tepelné procesy, Oteplení stroje

## **Key words**

Milling spindle, Machine-tools, Thermal model, Black box, Grey box, Temperature development prediction, Thermal processes, Machine Warming

## **Bibliografická citace**

CHLAPEK, Ondřej. *Identifikace teplotního modelu vřetene frézky*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129521>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Petr Hadraba.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Identifikace teplotního modelu vřetene frézky“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a zdrojů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

20. května 2021

.....

Ondřej Chlapek

## **Poděkování**

Tímto děkuji Ing. Petr Hadraba za cenné rady a připomínky při tvorbě této práce.

# Obsah

ÚVOD.....	9
1. Tepelné modely elektrických strojů.....	10
1.1 Modelování proudění.....	10
1.1.1 Modelování pomocí náhradní ventilační sítě.....	11
1.1.2 Modelování pomocí metody CFD .....	12
1.2 Modelování oteplení .....	12
1.2.1 Modelování pomocí náhradní tepelné sítě .....	13
1.2.2 Modelování pomocí metody konečných prvků .....	14
2. Přístupy k modelování .....	15
2.1 Black box model .....	15
2.2 White box model.....	15
2.3 Grey box model .....	16
3. Vřetena elektrických strojů.....	17
3.1 Zástavba vřetene .....	17
3.2 Uložení vřetene .....	18
3.3 Konstrukční dělení vřeten.....	18
3.3.1 Vřetena s řemenovým náhonem .....	19
3.3.2 Vřetena s ozubeným převodem.....	19
3.3.3 Vřetena s přímým náhonem .....	20
3.3.4 Vřetena s vestavěným náhonem .....	20
3.4 Motory .....	21
3.4.1 Obecný popis elektrických strojů .....	21
3.4.2 Stejnosměrné (DC) motory .....	22
3.4.3 Střídavé (AC) motory .....	24
4. Tvorba teplotních modelů.....	26
4.1 Black box model .....	26
4.2 Grey box model .....	28
4.3 Srovnání modelů .....	31
5. Závěr .....	32
6. Seznam použitých zdrojů.....	33
7. Seznam použitých obrázků .....	36
8. Seznam zkratk a symbolů .....	37
9. Seznam příloh .....	39



## ÚVOD

V dnešní době si již jen málokterý konstruktér, či návrhář dovede představit svou práci bez použití modelů. Ať už se jedná o 3D konstrukční modely, modely proudění, či modely predikující chování, jsou modely nedílnou součástí návrhu a testování jakéhokoli systému. Důvodů je mnoho, ovšem jedním z hlavních je jistě optimalizace návrhu.

Pomocí modelů jsme mimo jiné schopni určit, ve kterých místech a jakým způsobem bude řešený systém zatěžován, jak se bude zatížení při provozu v čase měnit a další jinak velmi obtížně získatelné informace, které potřebujeme pro správnou volbu parametrů (materiál, rozměry, výkon apod.) řešeného systému.

Co se týče zatížení, tak nehledě na to, jaký systém řešíme, ať už významně či ne, vždy bude v systému figurovat zatížení teplotní. Toto zatížení pak často vzniká zvýšením teploty v důsledku ztrát v systému, nejčastěji třením. V důsledku zvýšení teploty pak může dojít ke zhoršení vlastností daného systému (změna rozměrů namáhané součásti, zhoršení mazacích vlastností apod.), a v krajních případech může dojít i ke ztrátě funkčnosti namáhané součásti, případně k havárii.

V následujícím textu budou představeny základní typy modelování teplotních modelů a základní přístupy, kterými lze při tvorbě modelu postupovat. Dále pak budou rozebrána vřetena elektrických strojů, a budou vytvořeny dva modely popisující vývoj teploty vřetene.

# 1. Tepelné modely elektrických strojů

Tepelné modely elektrických strojů, jsou prostředky, které nám umožňují určit důležité parametry jednotlivých částí elektrického stroje, jakými jsou například, teplota součástí, či její oteplení. [1]

Tepelné modely v praxi běžně využívané můžeme rozdělit do dvou kategorií, a to modely proudění, a modely oteplení. Takovéto modely se pak běžně užívají jak při návrhu elektrických strojů (špatný návrh části stroje vede ke snížení životnosti zařízení, případně k předimenzování součástí a tím k vyšším pořizovacím nákladům) [2], tak při predikování chování těchto strojů za provozu.

## 1.1 Modelování proudění

Modely proudění jsou nástroje, pomocí kterých lze určit, jakým způsobem bude chladicí médium (např. vzduch, voda, olej) prostupovat řešeným systémem, a jaký vliv na daný systém bude mít. Toto proudění lze modelovat dvěma způsoby, a to modelováním pomocí náhradní ventilační sítě, a metodou CFD [1]. Ke správnému vytvoření takového modelu, je však nejprve zapotřebí provést tzv. ventilační výpočet.

### Ventilační výpočet

Tento výpočet se zabývá prouděním chladicí kapaliny částmi stroje a jeho cílem je určení velikosti průtoku chladiwa, rozdělení chladiwa, velikosti ventilačních ztrát a velikosti ztrát třením. Základními vztahy pro výpočet těchto veličin jsou [1]:

a) Rovnice kontinuity

$$Q = S \cdot v = konst. \quad (1.1)$$

V mechanice tekutin je tato rovnice vyjádřením zákona zachování hmotnosti. Člen  $Q$  v této rovnici určuje velikost průtoku,  $S$  je obsah plochy protékaného průřezu, a  $v$  je rychlost proudící kapaliny.

b) Bernoulliho rovnice

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p_h + \rho gh = konst. \quad (1.2)$$

V této rovnici vystupující  $\rho$  je hustota proudící kapaliny,  $v$  je rychlostí kapaliny,  $p_h$  je tlakem v kapalině,  $g$  gravitační zrychlení a  $h$  je vzdáleností od referenční hladiny. Často se pak tato rovnice používá mezi dvěma body na společné proudnici. V mechanice tekutin tato rovnice představuje zákon zachování energie.

c) Eulerova ventilační rovnice

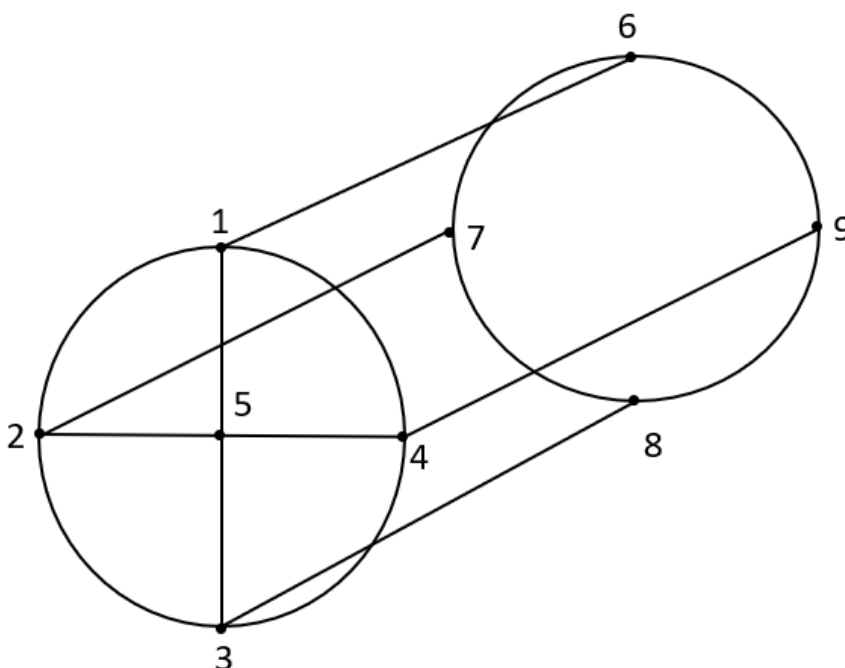
$$H_{TH} = \rho \cdot (u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1}) \quad (1.3)$$

Tato rovnice popisuje chování lopatkových strojů, a to tak, že z rychlostí proudící kapaliny na vstupu a na výstupu lopatkového stroje určuje tlak [1].  $H_{TH}$  je v této rovnici celkový tlak  $\rho$  je hustota proudící kapaliny,  $u_{1,2}$  jsou unášivé rychlosti na vstupu a výstupu stroje a  $c_{u1,2}$  jsou složky absolutních rychlostí směřující ve směru rychlosti unášivé na vstupu a výstupu. Ve ventilačním výpočtu, jsou pak nejčastěji řešené lopatkové stroje ventilátory.

### 1.1.1 Modelování pomocí náhradní ventilační sítě

Jak již název této metody napovídá, základem této metody, je vytvoření sítě, která popisuje, jak proudí chladicí kapalina strojem [1]. Cesty, kudy chladicí médium prostupuje strojem, nazýváme větve, a místa kde se tyto větve rozdělují či spojují, nazýváme uzly. Každou větev nadále popisují hydraulické odpory a tlakový zdroj. Tlakový zdroj větve je místo, které vytváří ventilační účinek ve větvi (např. ventilátor). Hydraulické odpory pak popisují kanály, kterými chladicí kapalina strojem prochází. Na Obr. 1.1 lze vidět příklad zjednodušené náhradní ventilační sítě stroje.

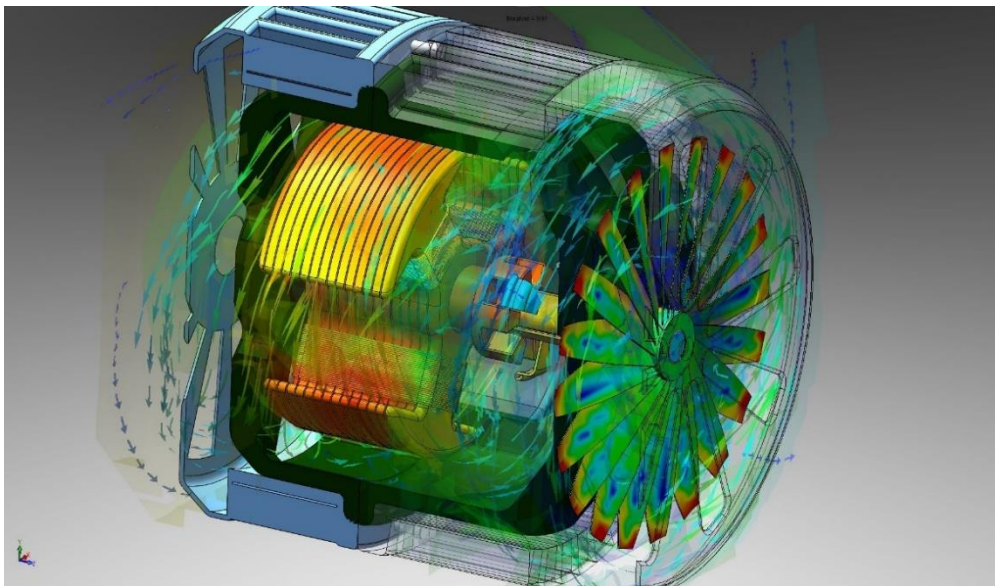
Hlavní výhodou této metody je její jednoduchost a poměrně rychlý analytický výpočet. Nevýhodou je ovšem nižší přesnost výpočtu [3].



Obr. 1.1 Zjednodušená náhradní ventilační síť (podle [1])

### 1.1.2 Modelování pomocí metody CFD

CFD neboli Computational Fluid Dynamics je numerickou metodou primárně sloužící k simulování průtoku média strojem [1] a k určení rozdělení různých parametrů při jeho protékání. Samotný výpočet probíhá na principu řešení Navier-Stokesových rovnic doplněných o fyzikální modely 3D laminárního a turbulentního proudění [4]. Na Obr. 1.2 lze vidět příklad modelování metodou CFD.



Obr. 1.2 Modelování proudění chladiva elektromotorem pomocí metody CFD [5]

Výhodami této metody jsou především vysoká přesnost výpočtu, a dále také možnost stanovení rozložení některých charakteristických veličin (rychlost, tlak) v proudící chladicí kapalině [3].

Možnosti takovýchto simulací jsou však vykoupeny vysokou výpočetní náročností. V první řadě, je třeba obstarat, případně vytvořit 3D model řešeného stroje. Dalším důležitým krokem, je z důvodu snížení potřebného výpočetního času (použitelnost výpočtu v praxi), dostatečné zjednodušení daného modelu, a to takovým způsobem, aby nebyla výrazně ovlivněna přesnost řešení.

## 1.2 Modelování oteplení

Modely oteplení bývají používány především pro zajištění správného chodu řešeného systému. Cílem při tvorbě těchto modelů je pak zamezení zhoršení vlastností stroje v důsledku zvýšení teploty některé z jeho částí.

Způsoby, kterými modelujeme oteplení elektrického stroje můžeme rozdělit do dvou kategorií, a to metody analytické, a numerické [6]. Analytickou metodou používanou pro takovýto výpočet je Modelování pomocí náhradní tepelné sítě. Mezi metody numerické pak patří Modelování pomocí metody konečných prvků.

Takovéto rozdělení metod je ovšem značně závislé na komplexnosti řešeného systému. Systémy, vyžadující složité náhradní tepelné sítě, se pak také řeší numericky.

### 1.2.1 Modelování pomocí náhradní tepelné sítě

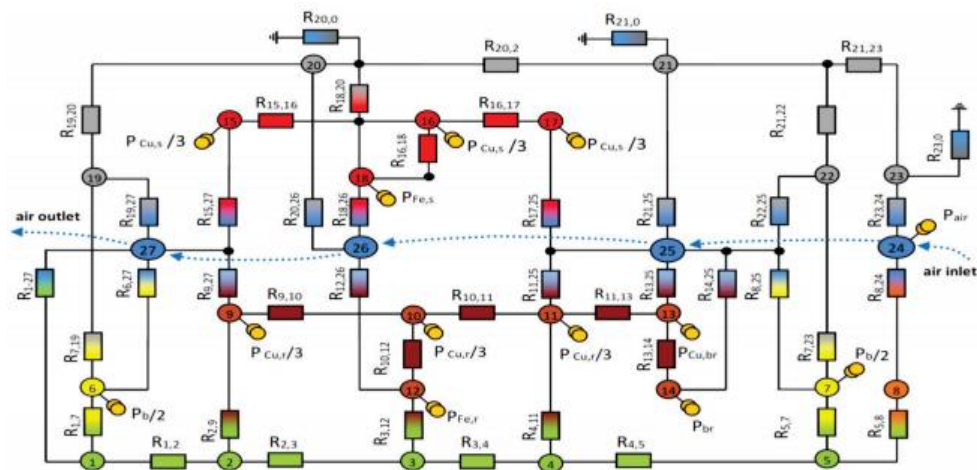
Tato metoda funguje na základě rozdělení stroje na menší části, které jsou jednodušeji řešitelné [1]. V podstatě dochází k náhradě elektrického stroje soustavou těles, které jsou mezi sebou propojeny, a také propojeny s místy, kudy se teplo odvádí.

K řešení takovýchto systémů se pak s výhodou používá tzv. elektrotepelná analogie [7]. Tento způsob připodobňuje tepelný systém elektrickému obvodu a řeší jej stejným způsobem, jako by byl řešen daný obvod. V Tab. 1.1 lze vidět analogii mezi jednotlivými veličinami vyskytujícími se v tepelných a elektrických obvodech a na Obr. 1.3 lze vidět příklad vytvořené tepelné sítě.

Tab. 1.1 Elektrotepelná analogie [7]

Elektrický obvod		Tepelný obvod	
Napětí	$U = U_1 - U_2 \text{ (V)}$	Teplotní rozdíl	$\Delta T = T_1 - T_2 \text{ (K)}$
Konduktivita	$\gamma \text{ (S} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}$	Tepelná vodivost	$\lambda \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$
Rezistivita	$\rho = \frac{1}{\gamma} \text{ (}\Omega \cdot \text{m}\text{)}$	Měrný tepelný odpor	$\frac{1}{\lambda} \text{ (m} \cdot \text{K} \cdot \text{)}$
Elektrická vodivost	$G = \frac{\gamma \cdot S}{l} \text{ (S)}$	Tepelná vodivost	$G = \frac{\lambda \cdot S}{l} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$
Elektrický odpor	$R = \frac{l}{\gamma \cdot S} \text{ (}\Omega\text{)}$	Tepelný odpor	$R = \frac{l}{\lambda \cdot S} \text{ (K} \cdot \text{W}^{-1}\text{)}$
Elektrický proud	$I = \int J \cdot dS \text{ (A)}$	Tepelný tok	$\Phi = \int q \cdot dS \text{ (W)}$

Výhodou této metody, je opět poměrně jednoduchý, a rychlý výpočet [6], a vzhledem k elektrotepelné analogii možnost využití softwaru používaného pro řešení elektrických obvodů. Jistou nevýhodou, či úskalím této metody je ovšem nutnost správného vytvoření sítě na základě stroje, který aktuálně zkoumáme, což nemusí být vždy jednoduchá záležitost.



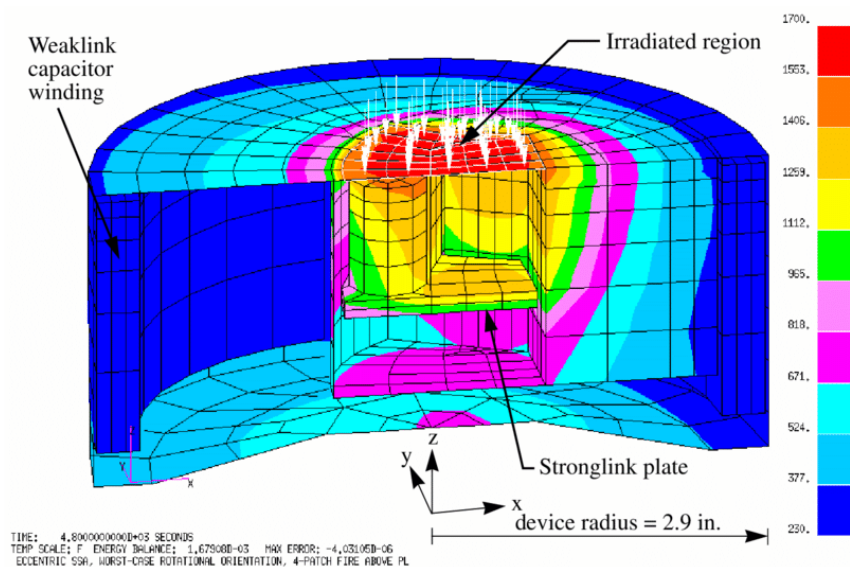
Obr. 1.3 Náhradní tepelná síť vysavače [6]

### 1.2.2 Modelování pomocí metody konečných prvků

Metoda konečných prvků neboli anglicky Finite Element Method je metodou fungující na principu rozdělení geometrie řešeného objektu na síť prvků, a následným řešením interakcí mezi jednotlivými prvky a okolím [1].

Tyto interakce jsou fyzikálně popsány parciálními diferenciálními rovnicemi. Tyto rovnice jsou touto metodou aproximovány na rovnice, které jsou řešitelné numerickými metodami a následně jsou vyřešeny [8].

Výhodami této metody jsou především její vysoká přesnost výsledku a také možnost podrobně zkoumat jednotlivá kritická místa u daného problému. Nevýhodou bude opět vyšší výpočetní náročnost, a tím také potřeba složité modely a geometrie zjednodušovat.



Obr. 1.4 Rozdělení teploty modelované pomocí Metody konečných prvků [9]

## 2. Přístupy k modelování

Co se týče tvorby modelů, existují primárně tři základní cesty, kterými se lze vydat. První možností je model typu black box, dalšími možnostmi jsou pak modely grey box a white box. Rozdíl mezi těmito typy modelů je především v množství informací, které je k vytvoření modelu řešeného systému třeba znát.

### 2.1 Black box model

Princip black box modelu spočívá v tom, že je na řešený systém, pohlíženo jen jako na vstupy a výstupy [10], přičemž to, jakým způsobem systém pracuje, případně co v něm probíhá není pro tvorbu modelu podstatné.

Výhodou tohoto typu modelu je jeho jednoduchost, toto je ovšem vykoupěno nižší přesností a v mnoha případech špatnou reprodukovatelností modelu [11].

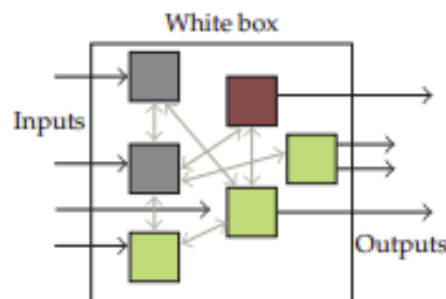


Obr. 2.1 Princip funkce black box modelu [12]

### 2.2 White box model

White box model je jakýmsi opakem black box modelu. K jeho vytvoření je potřeba znalosti všech dějů, které v systému probíhají, a zároveň i parametrů systému [11]. Z tohoto důvodu, lze všechny modely probírané v kapitole 1.2 považovat za white box modely. Princip funkce takového modelu lze vidět na Obr. 2.2.

Tyto modely pak dosahují poměrně vysokých přesností, ovšem vysoké požadavky na specifikaci je činí ne vždy použitelnými.



Obr. 2.2 Princip funkce white box modelu [13]

## **2.3 Grey box model**

Grey box model je kombinací obou výše zmíněných modelů. Kromě informací o vstupech a výstupech pracuje s částečnou znalostí dějů probíhajících v řešeném systému, ovšem parametry modelu známy nejsou, a je třeba je určit [11].

Díky tomu, je tento typ jakousi střední cestou mezi množstvím informací potřebných pro tvorbu modelu, a kvalitou popisu daného modelovaného děje.



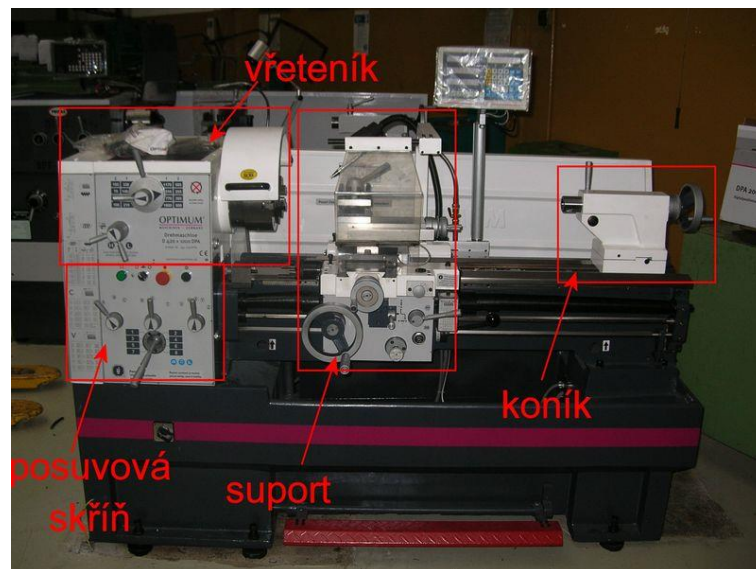
### 3. Vřetena elektrických strojů

Vřetena jsou jednou z hlavních částí elektrických strojů, používaných převážně k operacím spojeným s odebráním materiálu. U strojů určených například k vrtání či frézování vřeteno spojuje pohon elektrického stroje s nástrojem používaným k dané operaci a zajišťuje jeho otáčivý pohyb [14]. Naopak u strojů, jakými jsou například soustruhy zajišťují vřetena otáčivý pohyb obráběných součástí, zatímco nástroje zůstávají nehybné.

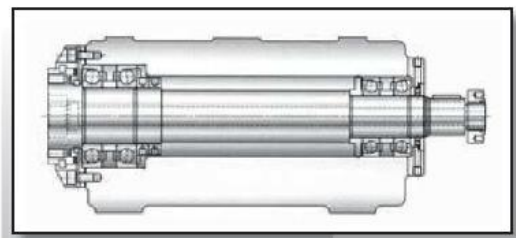
#### 3.1 Zástavba vřetene

Vřetena strojů bývají zpravidla umístěna v tzv. vřeteníku, jehož umístění v rámci konstrukce obráběcího stroje lze vidět na Obr. 3.1.

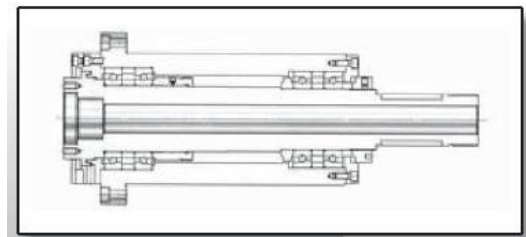
Následné uložení vřetena ve vřeteníku bývá nejčastěji realizováno jedním ze dvou způsobů. Prvním způsobem zástavby je tzv. těleso skříňového tvaru (Obr.3.2), druhou možností je pak tzv. tubus (Obr. 3.3) [15].



Obr. 3.1 Popis částí obráběcího stroje [16]



Obr. 3.2 Těleso skříňového tvaru [15]



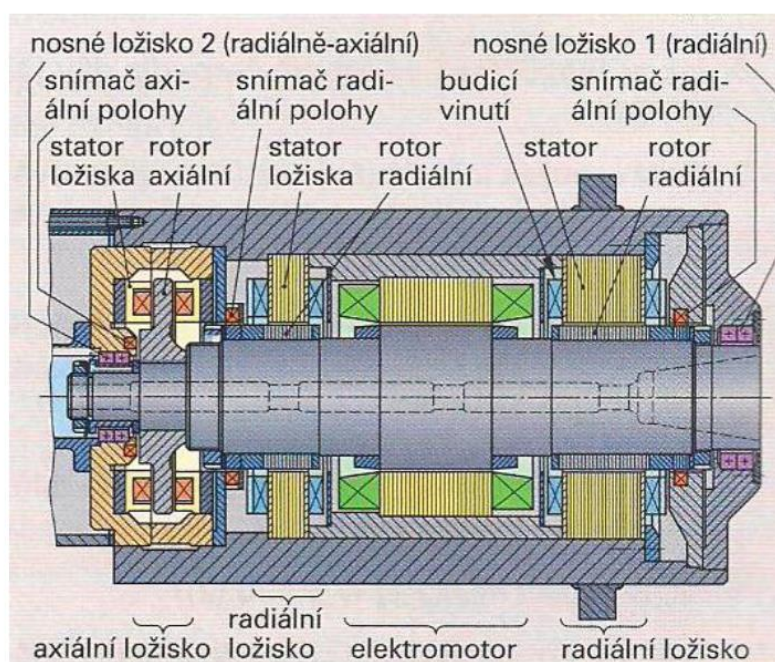
Obr. 3.3 Tubus [15]

### 3.2 Uložení vřetene

Vzhledem k přímému spojení vřetena s obráběnou součástí, případně s obráběcím nástrojem má uložení vřetena významný vliv na přesnost obrábění, a z toho vyplývající kvalitu obrobeneho dílu.

Uložení vřetena (Obr 3.4) je výhradně realizováno pomocí valivých ložisek, a to například pomocí dvou radiálních a dvou axiálních [15].

Vzhledem k tomu, že během provozu dochází k tzv. házení, což je efekt způsobený několika faktory, jako například nepřesností otáčení vřetena či nesouosostí plochy s osou otáčení, bývá ložisko umístěné nejbližší k přednímu konci vřetena navrhováno s vyšší přesností, aby došlo ke snížení negativních účinků tohoto jevu [15]. Zbytek ložisek je pak navržen s přesností běžnou.



Obr. 3.4 Uložení vřetena [17]

### 3.3 Konstrukční dělení vřeten

Vřetena elektrických strojů bývají standardně rozdělena podle typu náhonu do čtyř kategorií, a to na vřetena s řemenovým náhonem, vřetena s náhonem přes ozubený převod, vřetena s přímým náhonem a vřetena s vestavěným náhonem [14].

Vřetena jednotlivých těchto kategorií mají různé charakteristiky, a dosahují tedy různých výsledků, proto se také liší jejich pole působnosti.

### 3.3.1 Vřetena s řemenovým náhonem

U tohoto typu vřeten (Obr. 3.5) je motor spojen s vřetenem pomocí ozubeného řemene (Obr. 3.6) případně tzv. v-řemene (Obr. 3.7). Takovýto přenos mezi motorem a vřetenem dosahuje účinnosti okolo 95 % [14].



Obr. 3.5 Vřeteno s náhonem přes řemen [18]



Obr. 3.6 V-řemen [19]



Obr. 3.7 Ozubený řemen [20]

Tento typ vřeten dosahuje dobrých výsledků při rychlostech až 15000 otáček za minutu [14] a zároveň také u vysokých točivých momentů při nízkých otáčkách.

Výhodami tohoto typu vřeten jsou především poměrně nízká cena, jednoduchá údržba, a také použitelnost pro široké spektrum operací [14]. Nevýhodami jsou pak vyšší hluk při provozu, větší teplotní zatížení a snížení únosnosti ložisek způsobené napnutím řemene.

### 3.3.2 Vřetena s ozubeným převodem

Vřetena s ozubeným převodem jsou specifickým typem, používaným především pro velmi vysoké točivé momenty, při nízkých otáčkách. Spojení vřetene s motorem (Obr. 3.8) ovšem může vyvolávat vibrace a dosahuje poměrně nízkých účinností (pod 90 %) [14]. Zbytek energie je pak do okolí vyzářen v podobě tepla, což způsobuje značné teplotní zatížení.

Z těchto důvodů je tento typ vřeten vhodný především pro náročné procesy jako například vrtání, nevhodný je pak hlavně pro povrchové úpravy.



Obr. 3.8 Vřeteno s ozubeným převodem [21]

### 3.3.3 Vřetena s přímým náhonem

Vzhledem k tomu, že u tohoto typu je vřeteno přímo spojeno s motorem, dosahuje tento přenos téměř 100 % účinnosti [14]. Z toho také vyplývá, že nedochází k výraznému teplotnímu zatížení a nedochází k výrazným vibracím.

Tento typ je vhodný pro použití při vysokých otáčkách, ovšem pouze při poměrně nízkých točivých momentech. Používá se tedy především pro operace spojené s povrchovými úpravami [14]. Na obrázku 3.9 můžeme vidět vřeteno s přímým náhonem.



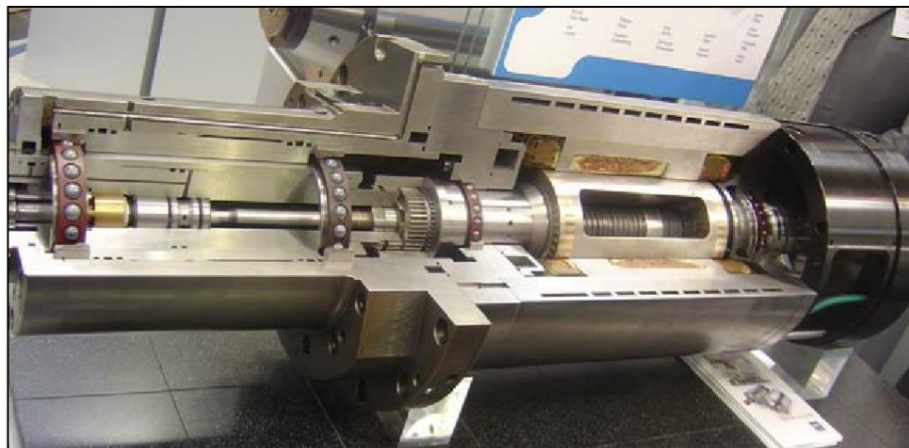
Obr. 3.9 Vřeteno s přímým náhonem [17]

### 3.3.4 Vřetena s vestavěným náhonem

Tento typ (Obr. 3.10), někdy také nazýván elektrovřeteno, je specifický tím, že motor pohánějící vřeteno je umístěn mezi ložisky samotného vřetena.

Takovéto uložení umožňuje značné snížení vibrací, což umožňuje provoz při velmi vysokých otáčkách (15000 otáček za minutu a výše) [14]. Při provozu za těchto otáček ovšem dochází k velkému teplotnímu zatížení, proto je u tohoto typu nutností chladicí

system, což ovšem společně s vysokými nároky na přesnost konstrukce vede k velmi vysokým pořizovacím nákladům.



Obr. 3.10 Vřeteno s vestavěným náhonem [14]

### 3.4 Motory

Tato podkapitola je věnována motorům běžně používaným pro pohon vřeten, případně dalších částí obráběcích strojů.

Motory elektrický strojů jsou zařízení, která dodávají vřetenům potřebný otáčivý pohyb. Spojení motoru s vřetenem, bývá standardně provedeno jedním ze způsobů popsaných v kapitole 3.3.

Co se týče typu používaných motorů, tak se jedná o elektromotory, které pak následně mohou používat stejnosměrný (DC) či střídavý (AC) proud, mohou být kartáčové či bezkartáčové, a mohou být také synchronní či asynchronní [14].

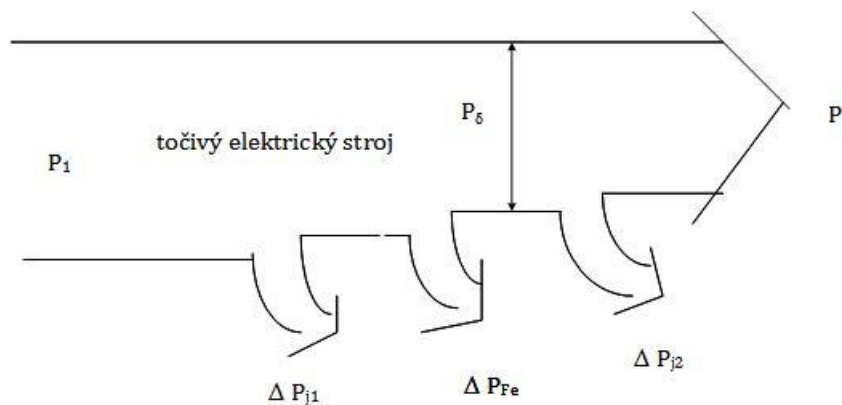
#### 3.4.1 Obecný popis elektrických strojů

Elektrické stroje, jsou zařízení, přeměňující energii. Takovéto stroje mohou přeměňovat energii elektrickou na energii mechanickou (motory), energii mechanickou, na energii elektrickou (generátory), a speciálním případem jsou pak transformátory, které přeměňují energii elektrickou, opět na energii elektrickou. V této práci budou popsány pouze motory.

Hlavními funkčními částmi motoru jsou část rotorová, a část statorová. Interakcí magnetických polí těchto částí pak následně vzniká síla, která způsobuje otáčivý pohyb.

Motory mohou být popsány několika různými parametry či charakteristikami, ovšem vzhledem k tématu této práce, je vhodné rozebrat jeden z těchto parametrů, a to výkon, respektive jeho ztráty. Energie ztraceného výkonu se přeměňuje na teplo, které pak může zvyšovat teplotu motoru, či jeho částí, a tím zhoršovat jeho vlastnosti. Tok výkonu motorem lze vidět na Obr. 3.11,





Obr. 3.11 Tok výkonu motorem [22]

kde  $P_1$  je příkon motoru odebíraný ze sítě (3.1),  $P$  je výkon motoru,  $\Delta P_{j1}$  jsou ztráty ve vinutí statoru,  $\Delta P_{j2}$  jsou ztráty ve vinutí rotoru,  $\Delta P_{Fe}$  jsou ztráty v železe a  $P_\delta$  je výkon procházející vzduchovou mezerou (3.2).

$$P_1 = m_f \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad (3.1)$$

V této rovnici vystupující  $m_f$  je počet fází,  $U_1$  je napětí na jedné fázi,  $I_1$  je proud na jedné fázi a  $\cos \varphi$  je účinník.

$$P_\delta = M \cdot \omega = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_1 \quad (3.2)$$

V rovnici 3.2 pak vystupuje  $M$  což vyjadřuje moment motoru a  $\omega$  což je úhlová rychlost otáčení magnetického pole statoru.

### 3.4.2 Stejnosměrné (DC) motory

Princip funkce stejnosměrného motoru spočívá v interakci mezi komutátorem a uhlíkovými kartáči [23]. Komutátor přivádí správně orientovaný proud do vinutí kotvy tak, že se v magnetickém poli vytváří točivý moment. Uhlíkové kartáče jsou pak umístěny mezi póly, tím vytvářejí tzv. pomocné póly, a zlepšují tak komutaci.

Tento typ motorů je možné u vřeten použít, ovšem častěji se tyto motory používají jako například pohony vedení stolů [14]. Na obrázku 3.11 lze vidět příklad standardního stejnosměrného motoru.



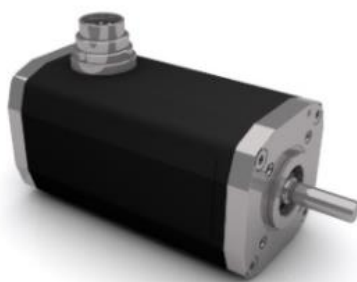
Obr. 3.12 DC motor Dunkermotoren řady 30.1/2 [23]

#### 3.4.2.1 Bezkartáčové stejnosměrné motory

Tento druh motoru, nazývaný také elektronicky komutovaný motor (Obr. 3.13), je modernějším typem standardního stejnosměrného motoru. U těchto motorů již nevystupují uhlíkové kartáče, motor je řízen elektronikou (frekvenční měnič či deska plošných spojů), a komutace je prováděna pomocí elektrického obvodu [14].

Výhodami těchto motorů jsou především v porovnání s klasickými stejnosměrnými motory vyšší životnost, a také účinnost [24].

Vzhledem ke značným výhodám tohoto typu, jsou bezkartáčové stejnosměrné motory v rámci obráběcích strojů hojně využívány k řadě úkonů, jako například k frézování či vrtání.



Obr. 3.13 Bezkartáčový stejnosměrný motor řady BG 45 [25]

#### Momentové motory

Jednou z variant motorů používaných u vřeten s přímým náhonem je tzv. momentový motor (Obr. 3.14). Momentové motory se od standardních stejnosměrných motorů liší kromě jiného také tím, že jsou to vždy motory s přímým náhonem, mají velké diametrální a malé axiální rozměry, a ve středu mohou být duté, což vede k nižší hmotnosti, a lze to také využít k různým konstrukčním řešením [26].

Tyto motory jsou specifické svým použitím při vysokých točivých momentech, ovšem pouze za předpokladu dosti nízkých otáček [26]. Výhodami těchto motorů pak bývá vysoká přesnost, velká torzní tuhost a také v porovnání s dalšími typy motorů nízká hmotnost. V oblasti obráběcích strojů se pak tyto motory využívají například jako pohony otočných stolů.



Obr. 3.14 Momentové motory DDR [27]

### 3.4.3 Střídavé (AC) motory

Motory užívající střídavý proud, jsou tak jako stejnosměrné motory složeny ze stacionární satorové, a rotující rotorové části. Vzájemnou interakcí magnetických polí těchto částí pak vzniká výsledný točivý moment. Tyto motory jsou dále rozděleny na motory synchronní a asynchronní.

#### 3.4.3.1 Synchronní motory

Synchronní motory (Obr. 3.15) jsou specifické tím, že otáčky rotoru jsou stejné s otáčkami magnetického pole satoru. Tyto stroje pak mají konstantní rychlost otáčení, kterou lze dle rovnice 3.3 přepočítat na otáčky za minutu. V rovnici vystupující  $f$  je pak kmitočet napájecího napětí, zatímco  $p$  je počet pólových dvojic.

$$n = \frac{f}{p} \cdot 60 \quad (3.3)$$



Obr. 3.15 Synchronní motor Baumüller DS2-132 [28]

Výhodami synchronních motorů jsou především nižší hmotnost a vyšší účinnost [29].



### 3.4.3.2 Asynchronní motory

Z důvodu konstrukce asynchronního motoru dochází k indukci proudu v rotoru pouze za předpokladu, že se magnetická pole statoru a rotoru vůči sobě pohybují. Z toho tedy vyplývá, že otáčky rotoru  $n_2$  nemohou být shodné s otáčkami statoru  $n_1$ . Poměr mezi těmito otáčkami pak charakterizuje veličina zvaná skluz (3.2). Příklad asynchronního motoru lze vidět na Obr. 3.16.

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (3.4)$$

Výhodami těchto motorů jsou především jednoduchá konstrukce a údržba [30].



Obr. 3.16 2 - pólový, třífázový asynchronní motor Raveo [31]

## 4. Tvorba teplotních modelů

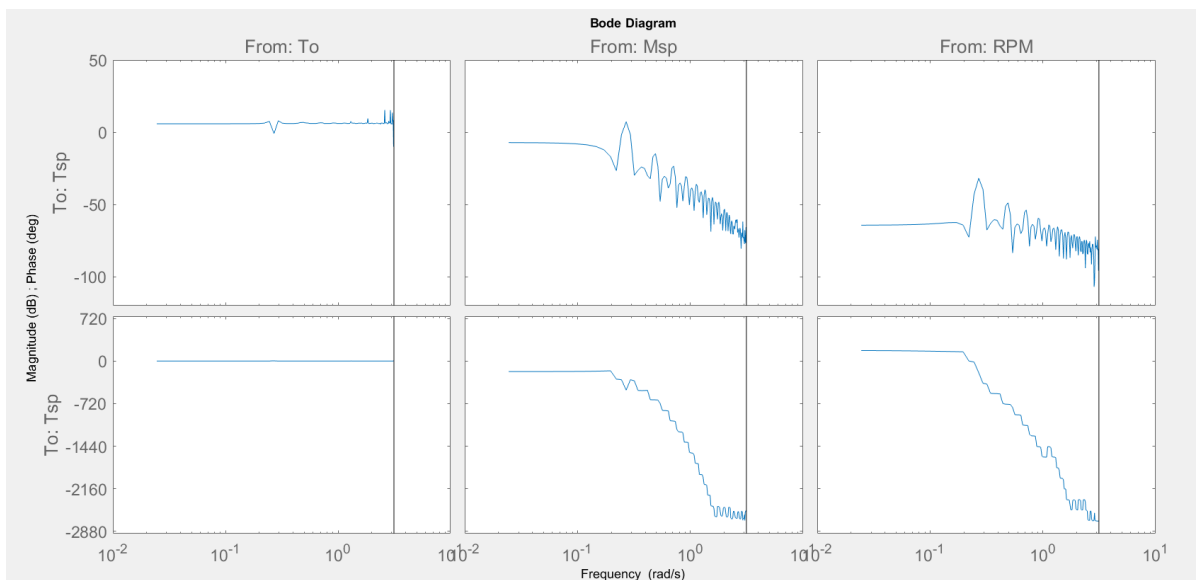
Cílem této práce je na základě dat naměřených při provozu stroje vytvořit dva modely popisující vývoj dané měřené veličiny. V tomto případě se jedná o motor Siemens 1PH7131-2NG03-0LC0 a měřené veličiny jsou teplota vřetene, teplota okolí, moment na vřetení, a otáčky vřetene.

Oba následující modely byly vytvořeny pomocí programu MATLAB. Naměřená data byla rozdělena na dvě poloviny, na první byly modely vytvořeny, a aplikovány na druhou polovinu. Toto rozdělení bylo provedeno abychom mohli zhodnotit, jestli jsou vytvořené modely reprodukovatelné pro další data. Skripty s kódy modelů jsou obsaženy v příloze.

### 4.1 Black box model

K vytvoření black box modelu byl použit SystemIdentification toolbox obsažený, v již výše zmíněném programu MATLAB. Naměřená data byla nejprve rozdělena na vstupy (teplota okolí, moment na vřetenu a otáčky vřetena) a na výstupy (teplota vřetena) a z nich byl vytvořen objekt dále potřebný pro tvorbu modelu.

Dalším důležitým krokem bylo posouzení vlivu jednotlivých vstupů na výstupní teplotu vřetene. Toto bylo provedeno vypočtením frekvenční odezvy jednotlivých vstupů, výsledky byly promítnuty do bode diagramu (Obr. 4.1) a pro každý vstup byl určen možný řád odezvy.

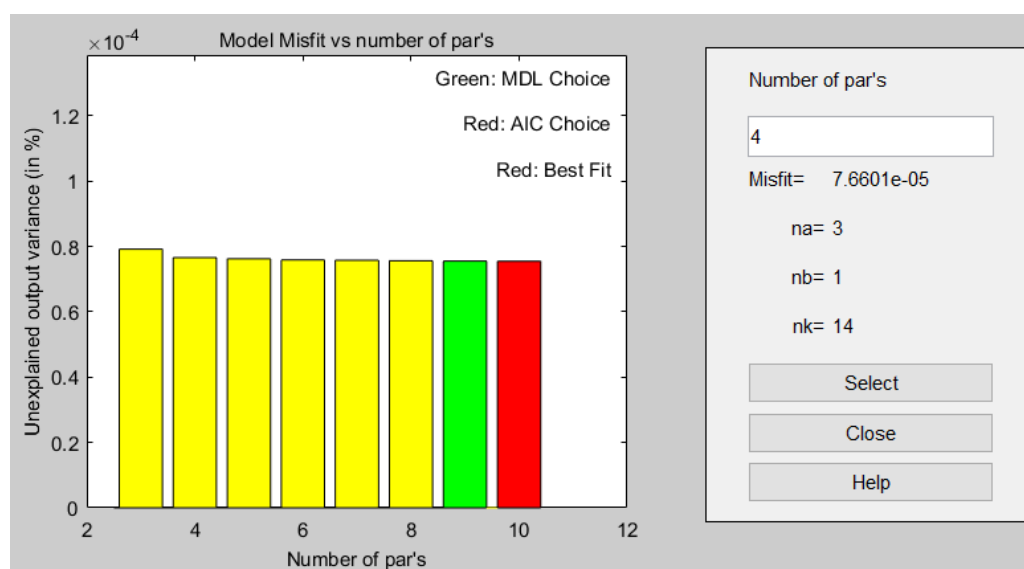


Obr. 4.1 Frekvenční odezva jednotlivých vstupů

Z tohoto diagramu lze vidět, že odezva teploty okolí ( $T_o$ ) na teplotu vřetena ( $T_{sp}$ ) by mohla být nultého řádu, odezva momentu ( $M_{sp}$ ) by mohla být řádu druhého a odezva otáček vřetene ( $RPM$ ) řádu prvního. Přesné hodnoty těchto řádů není v této fázi třeba znát, jde především o přibližný odhad, který bude použit dále při tvorbě modelu.

Pro vytvoření modelu pomocí SystemIdentification Toolboxu je potřeba programu zadat parametry onoho modelu. Těmito parametry jsou zpoždění neboli delay, a pak také řád modelu. Oba tyto parametry jsou vypočteny pro všechny vstupy, a při vytváření modelu jsou zadávány jako řádkové vektory.

Zpoždění bylo vypočteno pro všechny vstupy, pomocí vestavěné funkce v SystemIdentification Toolboxu. Co se týče řádu modelu, ten byl určen pro každý vstup zvlášť pomocí vytvořeného ARX modelu (Obr. 4.2).

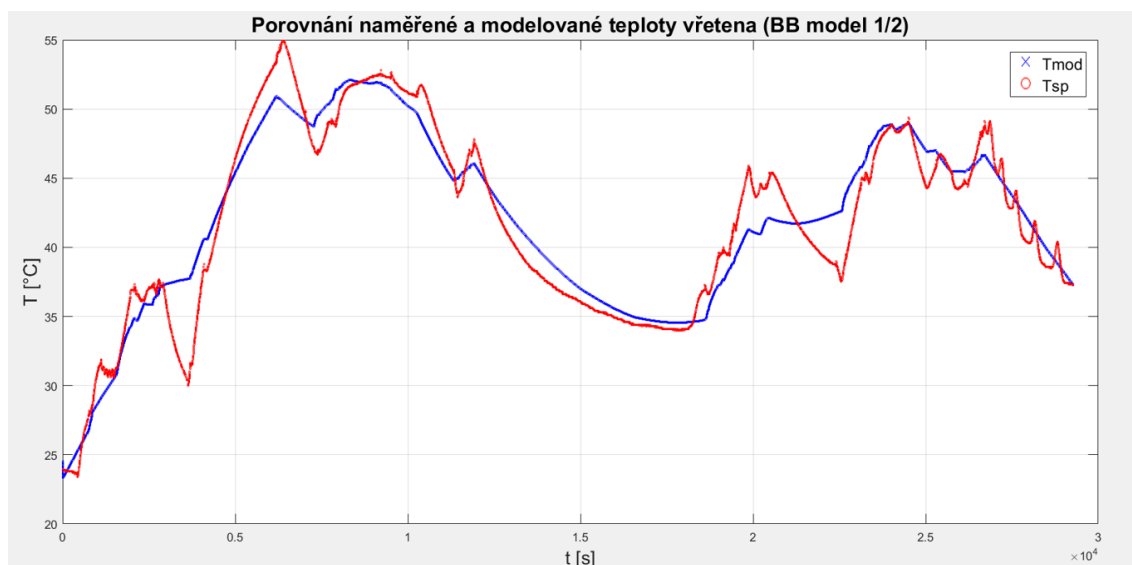


Obr. 4.2 ARX model pro vstup Msp

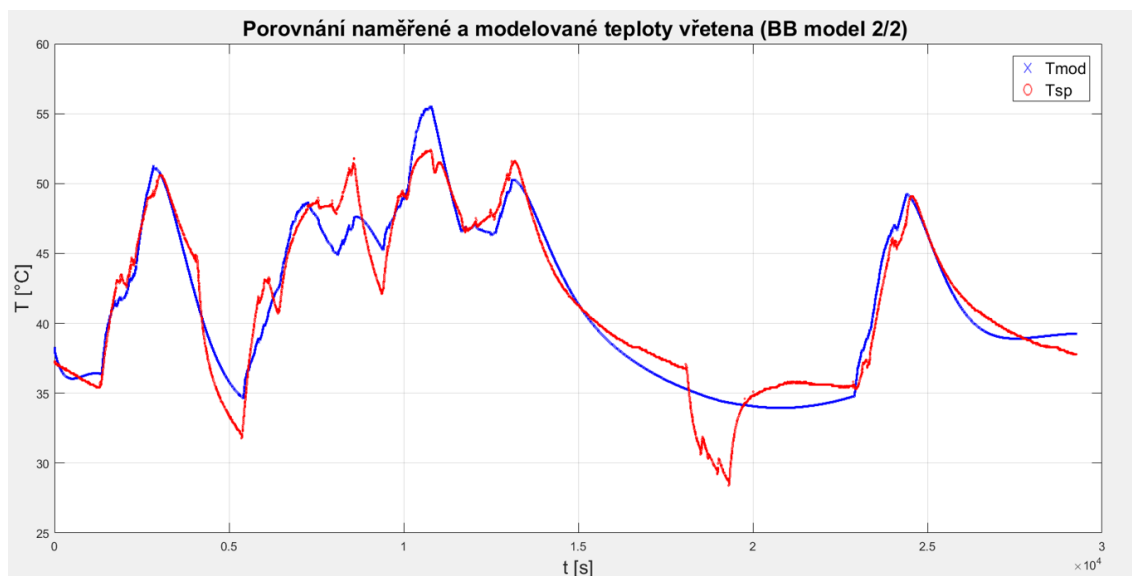
V takovémto modelu vystupuje na ose x počet parametrů, zatímco na ose y jakási velikost odchylky výstupu. V pravé části lze pak vidět pro zvolený sloupec (počet parametrů) hodnoty *na* určující řád modelu, *nb* určující počet nul a *nk* ukazující již dříve vypočtené zpoždění. K vytvoření těchto modelů byly použity dříve získané odhady řádu odezvy jednotlivých vstupů a také vypočtené zpoždění.

Sloupce označené jinou než žlutou barvou jsou pak podle různých charakteristik označeny jako nejlepší. Ovšem v tomto případě vzhledem ke značně nevýrazným rozdílům v ypsilonových souřadnicích byl vybrán sloupec odpovídající počtu parametrů 4, s hodnotami uvedenými na Obr. 4.2. Tento výběr byl proveden z důvodu snížení řádu modelu, což vede ke zjednodušení řešení modelu, při nepatrném snížení kvality. Takovýto proces byl proveden pro všechny vstupy.

Se všemi známými parametry byl vytvořen finální model, který byl vykreslen (Obr. 4.3) a porovnán s naměřenými daty. Posledním krokem pak bylo aplikování vytvořeného modelu na druhou polovinu naměřených dat, opětovné vykreslení modelu (Obr. 4.4) a porovnání.



Obr. 4.3 Naměřená a modelovaná teplota pomocí BB modelu (první část)



Obr. 4.4 Naměřená a modelovaná teplota pomocí BB modelu (druhá část)

## 4.2 Grey box model

Jak již bylo zmíněno v práci výše, pro tvorbu grey box modelu je zapotřebí částečné znalosti dějů, které v řešeném systému probíhají. V našem případě byla použita rovnice popisující teplotní chování ve tvaru:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q}{m \cdot c} + \frac{\kappa \cdot (T_{sp} - T_o)}{m \cdot c}. \quad (4.1)$$

V této rovnici vystupující  $q$  je teplotní tok,  $m$  hmotnost,  $c$  tepelná kapacita,  $\kappa$  ochlazovací konstanta,  $T_{sp}$  teplota vřetene,  $T_o$  teplota okolí a  $t$  je čas. Následný model byl pak postaven podle rovnice 4.2,

$$y = \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \quad (4.2)$$

kde  $y$  je teplotní gradient,  $x_1$  je zátěž,  $x_2$  teplotní spád a  $\beta_{1-3}$  jsou neznámé koeficienty.

Cílem bylo tedy pomocí naměřených dat určit konstanty  $\beta_i$ , ty pak dosadit do rovnice 4.2, a pomocí ní vytvořit požadovaný model. V tomto případě postup spočíval nejprve v určení parametrů  $x_1$ ,  $x_2$  a  $y$  z dat experimentálně naměřených, pak s jejich znalostí určení zbývajících konstant  $\beta_i$ , a výsledného vytvoření modelu.

Zátěž vřetene ( $x_1$ ) nebylo nutné nijak počítat, jelikož se rovnala přímo naměřenému momentu na vřetenu. Co se týče teplotního spádu ( $x_2$ ), ten byl určen jako rozdíl mezi teplotou vřetene a teplotou okolí (4.3) a nakonec teplotní gradient ( $y$ ) byl určen jako rozdíl dvou po sobě následujících naměřených teplot vřetene (4.4).

$$x_2(i) = T_{sp}(i) - T_o(i) \quad (4.3)$$

$$y(i) = T_{sp}(i + 1) - T_{sp}(i) \quad (4.4)$$

Přepsáním rovnice 4.2 dostaneme tvar:

$$y = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} \cdot [x_1 \quad x_2 \quad 1] \quad (4.5)$$

Z této rovnice pak bylo možno dopočíst konstanty  $\beta_{1-3}$ :

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} = [x_1 \quad x_2 \quad 1] \backslash y \quad (4.6)$$

Se známými hodnotami konstant byl na základě rovnice 4.2 vypočten modelovaný teplotní gradient (4.7) a pomocí něj pak modelovaná teplota vřetene (4.8).

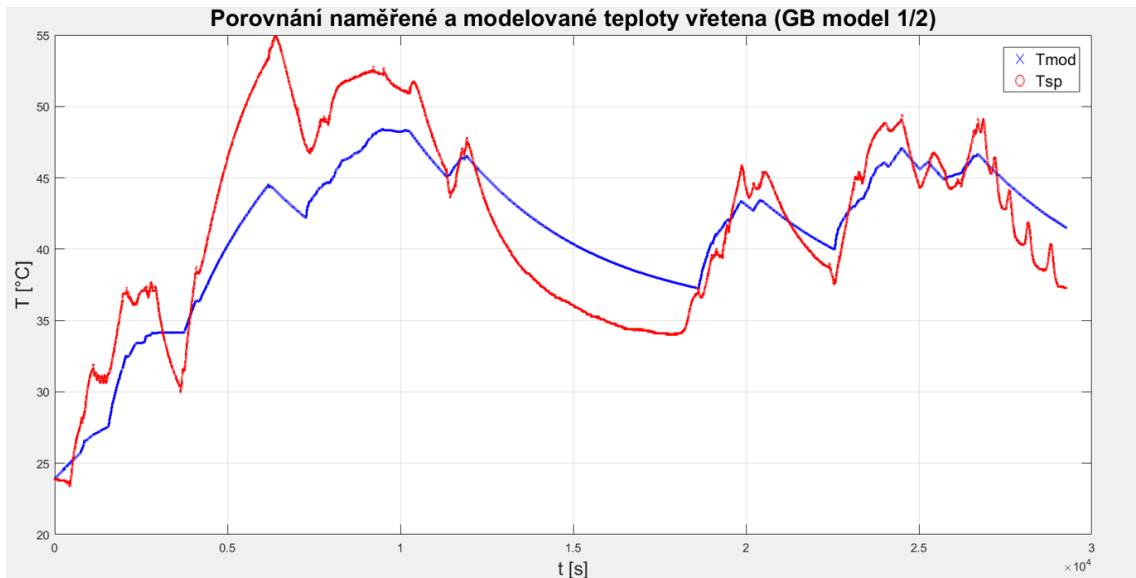
$$y_m(i) = \beta_1 \cdot x_1(i) + \beta_2 \cdot x_{2m}(i) + \beta_3 \quad (4.7)$$

$$T_m(i + 1) = T_m(i) + y_m(i) \quad (4.8)$$

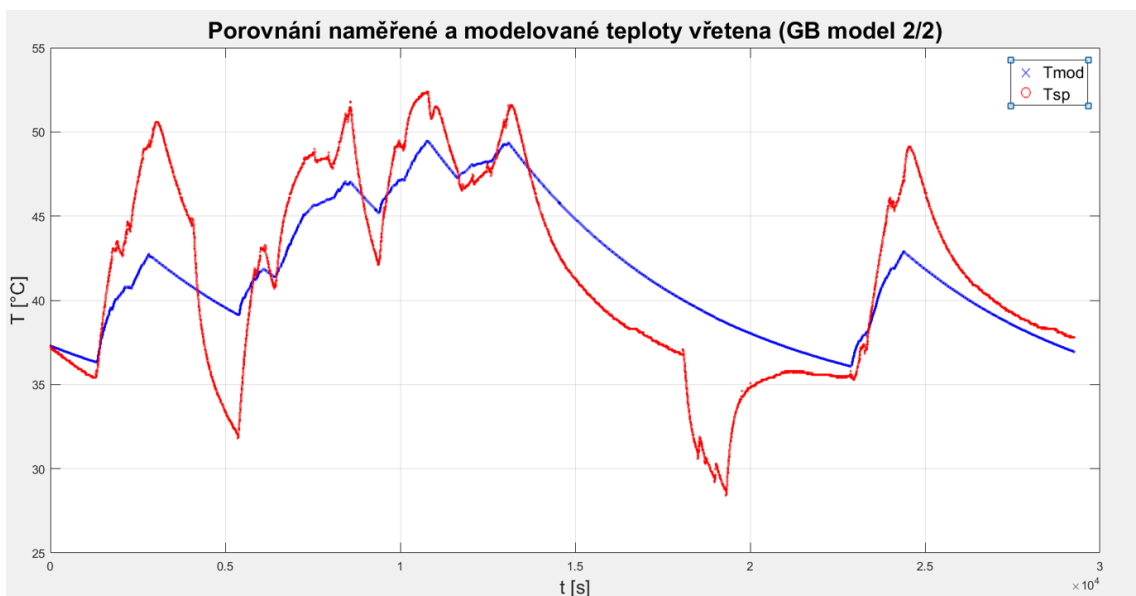
V rovnici 4.7 pak vystupuje člen  $x_{2m}(i)$ , který zastupuje nově vypočtený (modelovaný) teplotní spád, který je vypočten podle rovnice 4.9.

$$x_{2m}(i) = T_m(i) - T_o(i) \quad (4.9)$$

Posledním krokem pak bylo vykreslení modelované teploty vřetena společně s teplotou naměřenou, a jejich porovnání (Obr. 4.5). Takto vytvořený model byl pak aplikován na druhou polovinu naměřených dat a výsledek byl opět vykreslen (Obr. 4.6).



Obr. 4.5 Naměřená a modelovaná teplota pomocí GB modelu (první část)



Obr. 4.6 Naměřená a modelovaná teplota pomocí GB modelu (druhá část)

### 4.3 Srovnání modelů

K určení kvality obou modelů byly použity dva z koeficientů k tomuto účelu běžně používaných. Prvním takovýmto koeficientem je procentní chyba (4.10), určující, jaký je procentuální rozdíl mezi hodnotou modelovanou a naměřenou.

$$p_e = \frac{|X_m - X_{exp}|}{X_{exp}} \cdot 100 \quad (4.10)$$

V rovnici 4.10 je pak člen  $X_m$  modelovaná hodnota a  $X_{exp}$  hodnota naměřená.

Jako druhým hodnotícím kritériem byla použita tzv. střední kvadratická chyba (MSE), která určuje kvalitu modelu pomocí druhé mocniny střední hodnoty vzdálenosti mezi hodnotou naměřenou a modelovanou [32]. Střední kvadratickou chybu lze spočítat podle rovnice 4.11,

$$MSE = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a (X_{exp} - X_m)^2 \quad (4.11)$$

kde  $X_{exp}$  je opět hodnotou naměřenou,  $X_m$  hodnotou modelovanou, a  $a$  je počet naměřených hodnot. Hodnoty těchto koeficientů byly spočteny pro oba modely, pro obě poloviny dat zvlášť, a výsledky byly zapsány do tabulky 4.1.

Tab. 4.1 Vypočtené hodnoty koeficientů popisujících kvalitu modelu

Model [-]	BB 1/2	GB 1/2	BB 2/2	GB 2/2
<b>pe_avg [%]</b>	3,62	7,30	3,18	6,84
<b>pe_max [%]</b>	25,65	19,80	20,86	36,13
<b>MSE [1]</b>	3,67	13,76	2,61	12,01

V této tabulce, kde BB či GB určuje typ modelu (black box, grey box), 1/2 či 2/2 určuje polovinu dat pro kterou jsou výsledky počítány, pe\_avg je průměrná procentní chyba a pe\_max je pak maximální procentní chyba, lze vidět, že vzhledem k tomu, že vypočtené hodnoty určují velikost chyby, které se daný model dopouští, a z toho tedy vyplývá, že čím je hodnota menší, tím lépe daný model data popisuje, dosahuje black box model výrazně lepších výsledků.

## 5. Závěr

V teoretické části této práci bylo nejprve provedeno základní seznámení s možnostmi tvorby teplotních modelů, dále pak seznámení s přístupy, kterými lze teplotní modely tvořit, a nakonec byla provedena rešerše na vřetena obráběcích strojů. V praktické části pak bylo cílem vytvořit dva teplotní modely, které by na základě naměřených provozních dat predikovaly vývoj teploty vřetene.

K vytvoření obou modelů byl použit software Matlab a v něm obsažené toolboxy pro tuto problematiku používané. Přesnost vytvořených modelů byla určena pomocí statistických metod, a modely byly mezi sebou porovnány.

Z výsledků lze vidět, že výrazně horší přesnosti dosahuje grey box model. Takovýto výsledek nebyl vzhledem k tomu, že u grey box modelu jsou data modelována na základě vztahů platících v řešeném systému očekáván. Tyto výrazné odchylky od naměřených dat byly nejspíše způsobeny více faktory. Jedním z důležitých faktorů by mohlo být poměrně hrubé vzorkování dat (1 sekunda), dalším významným faktorem ovlivňující výsledky je fakt, že náš řešený systém je motor, obsahující prvky ovlivňující teplotu (ventilátor), o jejichž spínání či provozu nemáme žádné informace. Z těchto důvodů by tento model nemohl být použit jako nástroj pro přesné modelování teploty. Takto vytvořený model by pak mohl být použit například k dlouhodobějšímu měření změny odchylky od naměřených dat.

Z výsledků pak lze také vidět, že přestože dopadl black box model výrazně lépe, jsou hodnoty chyb tohoto modelu stále poměrně vysoké, a tudíž i použití tohoto modelu pro přesné modelování dat by bylo na zvážení. Tyto odchylky pak mohly být opět způsobeny příliš hrubým vzorkováním naměřených dat.

Posledním úkolem bylo zhodnocení reprodukovatelnosti modelů. Z tohoto důvodu byla naměřená data rozdělena na dvě poloviny, na první polovině byly modely vystavěny, a na druhou polovinu aplikovány. Z výsledků lze pak vidět, že rozdíl ve velikostech chyb jednotlivých modelů pro jednotlivé datové sady není výrazný. Z tohoto lze tedy usoudit, že jsou oba vytvořené modely reprodukovatelné.



## 6. Seznam použitých zdrojů

- [1] VLACH, Radek. Chlazení elektrických strojů. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické, 2004. ISBN 80-214-2848-1.
- [2] KACEM, Moez Hadj, Souhir TOUNSI a Rafik NEJI. Thermal Modelling of Electric Machines [online]. Bookboon, c2016 [cit. 2021-02-10]. ISBN 978-87-403-1558-5. Dostupné z: <http://www.musaliarcollege.com/e-Books/EEE/TMOEM.pdf>
- [3] POHLANDT, C. a M. GEIMER. Thermal models of electric machines with dynamic workloads. *Landtechnik* [online]. Kuratorium fur Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), 2015, **70**(4), 97-112 [cit. 2021-02-10]. ISSN 00238082. Dostupné z: doi:10.1515/lt.2015.2664
- [4] BOGLIETTI, A, A CAVAGNINO, D STATON, M SHANEL, M MUELLER, C MEJUTO a A BOGLIETTI. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2009, **56**(3) [cit. 2021-02-14]. ISSN 0278-0046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2008.2011622
- [5] CEGLARSKI, Daniel a Kolio KOJOUHAROV. Electromobility. *Termoflow* [online]. [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.termoflow.com/page/e-mobility>
- [6] DUHOVNIK, Jože, Janez RIHTARŠIČ, Blaž BENEDIK a Jože TAVČAR. Thermal model of through flow universal motor by means of lumped parameter network. *Tehnički vjesnik* [online]. Faculty of Mechanical Engineering in Slavonski Brod, Faculty of Electrical Engineering in Osijek, Faculty of Civil Engineering in Osijek, 2017, **24**(2), 405-412 [cit. 2021-02-14]. ISSN 1330-3651. Dostupné z: doi:10.17559/TV-20161115224752
- [7] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. Elektrotepelná technika. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. : il. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [8] The Finite Element Method (FEM). *Comsol* [online]. c2021 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>
- [9] ELDRED, M. S., W. E. HART, W. J. BOHNHOFF, V. J. ROMERO, S. A. HUTCHINSON a A. G. SALINGER. Utilizing object-oriented design to build advanced optimization strategies with generic implementation. 6. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)/USAF/NASA/ISSMO symposium on multidisciplinary analysis and optimization, Bellevue [online]. Sandia National Laboratories, 1996 [cit. 2021-02-15]

- [10] Holzinger, Andreas; Plass, Markus; Holzinger, Katharina; Crisan, Gloria Cerasela; Pintea, Camelia-M.; Palade, Vasile (3 August 2017). "A glass-box interactive machine learning approach for solving NP-hard problems with the human-in-the-loop". arXiv:1708.01104 [cs.AI].
- [11] Bohlin, Torsten P. (7 September 2006). Practical Grey-box Process Identification: Theory and Applications. Springer Science & Business Media. ISBN 978-1-84628-403-8.
- [12] Using the Black Box Model to Design Better Websites. *Design shack* [online]. Compact Creative, c2021 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://designshack.net/articles/business-articles/using-the-black-box-model-to-design-better-websites/>
- [13] VOLOVOI, Vitali. System Reliability at the Crossroads. *ISRN Applied Mathematics* [online]. International Scholarly Research Network, 2012, **2012**(2012) [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: doi:10.5402/2012/850686
- [14] LÓPEZ DE LACALLE, L.N a A LAMIKIZ. Machine Tools for High Performance Machining. London: Springer London, 2009. ISBN 9781848003798. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-84800-380-4
- [15] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [16] Části soustruhů. ELUC [online]. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1221>
- [17] JANÍČKOVÁ, Petra. Moderní konstrukční řešení CNC strojů. Uherské Hradiště, 2010.
- [18] Goman, V.V.. (2020). Prospects of Upgrade of the Main Drives of CNC Machine Tools Using Mechatronic Modules. KnE Engineering. 10.18502/keg.v5i3.6755.
- [19] Industrial Vbelt V-Belt fits Dayco # L452 [online]. c2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://czech.desertcart.com/products/45232060-dayco-industrial-vbelt-v-belt-l-452-1-2-x-52>
- [20] Reely plochý ozubený řemen Vnější obvod: 330 mm Počet zubů: 65. Conrad [online]. c2020 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/reely-plochy-ozuben-y-remen-vnejsi-obvod-330-mm-pocet-zubu-65-226076>

- [21] >GEAR DRIVEN SPINDLE REPAIR & REBUILD SERVICES [online]. c2016 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <http://www.colonialtool.com/gear-driven-spindles>
- [22] Trojfázový indukční motor - chod naprázdno [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/777>
- [23] STEJNOSMĚRNÉ KARTÁČOVÉ MOTORY DUNKERMOTOREN ŘADY G 30.1/2. Raveo [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/stejnosmerne-kartacove-motory-dunkermotoren-G-30-1-2>
- [24] Jaký je rozdíl mezi AC, DC a EC motory? E-konstruktor [online]. c2013-2017 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://e-konstruktor.cz/novinka/jaky-je-rozdiel-mezi-ac-dc-a-ec-motory>
- [25] STEJNOSMĚRNÉ BEZKARTÁČOVÉ MOTORY ŘADY BG 45. Raveo [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/stejnosmerne-bezkartacove-motory-dunkermotoren-BG-45>
- [26] MOMENTOVÉ MOTORY. Raveo [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/momentove-motory>
- [27] MOMENTOVÉ MOTORY DDR. Raveo [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/momentove-motory-DDR>
- [28] Třífázový synchronní motor DS2 – s chlazením pro větší výkon. Baumüller [online]. c2021 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.baumueller.com/cs/produkty/motory/hlavni-pohony/ds2>
- [29] Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice (1. část). ELEKTRO [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/uplatneni-synchronnich-stroju-v-dopravni-technice-1-cast--13092>
- [30] ASYNCHRONNÍ MOTORY. Raveo [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/asynchronni-motory>
- [31] 2-PÓLOVÉ, TŘÍFÁZOVÉ ASYNCHRONNÍ MOTORY - RAVEO. Raveo [online]. [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/AC-motory-trifazove-2-polove-RAVEO>
- [32] Mean Squared Error: Definition and Example [online]. c2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/statistics-definitions/mean-squared-error/>

## 7. Seznam použitých obrázků

Obr. 1.1 Zjednodušená náhradní ventilační síť (podle [1]) .....	11
Obr. 1.2 Modelování proudění chladiva elektromotorem pomocí metody CFD [5] .....	12
Obr. 1.3 Náhradní tepelná síť vysavače [6] .....	14
Obr. 1.4 Rozdělení teploty modelované pomocí Metody konečných prvků [9].....	14
Obr. 2.1 Princip funkce black box modelu [12] .....	15
Obr. 2.2 Princip funkce white box modelu [13] .....	15
Obr. 3.1 Popis částí obráběcího stroje [16].....	17
Obr. 3.2 Těleso skříňového tvaru [15].....	17
Obr. 3.3 Tubus [15].....	17
Obr. 3.4 Uložení vřetena [17] .....	18
Obr. 3.5 Vřeteno s náhonem přes řemen [18].....	19
Obr. 3.6 V-řemen [19] .....	19
Obr. 3.7 Ozubený řemen [20] .....	19
Obr. 3.8 Vřeteno s ozubeným převodem [21] .....	20
Obr. 3.9 Vřeteno s přímým náhonem [17].....	20
Obr. 3.10 Vřeteno s vestavěným náhonem [14] .....	21
Obr. 3.11 Tok výkonu motorem [22].....	22
Obr. 3.12 DC motor Dunker motoren řady 30.1/2 [23].....	23
Obr. 3.13 Bezkartáčový stejnosměrný motor řady BG 45 [25].....	23
Obr. 3.14 Momentové motory DDR [27] .....	24
Obr. 3.15 Synchronní motor Baumüller DS2-132 [28] .....	24
Obr. 3.16 2 - pólový, třífázový asynchronní motor Raveo [31] .....	25
Obr. 4.1 Frekvenční odezva jednotlivých vstupů .....	26
Obr. 4.2 ARX model pro vstup Msp.....	27
Obr. 4.3 Naměřená a modelovaná teplota pomocí BB modelu (první část).....	28
Obr. 4.4 Naměřená a modelovaná teplota pomocí BB modelu (druhá část) .....	28
Obr. 4.5 Naměřená a modelovaná teplota pomocí GB modelu (první část).....	30
Obr. 4.6 Naměřená a modelovaná teplota pomocí GB modelu (druhá část).....	30

## 8. Seznam zkratek a symbolů

Zkratka	Jednotky	Význam
$3D$	$[-]$	trojrozměrný
$CFD$	$[-]$	metoda výpočtu dynamiky tekutin
$Q$	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	průtok
$S$	$[m^2]$	obsah průřezu
$v$	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost proudící kapaliny
$\rho$	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota kapaliny
$p_h$	$[Pa]$	hydrostatický tlak
$g$	$[m \cdot s^{-2}]$	gravitační zrychlení
$h$	$[m]$	vzdálenost od referenční hladiny
$H_{TH}$	$[Pa]$	tlak dodaný lopatkovým strojem
$u_1/u_2$	$[m \cdot s^{-1}]$	unášivá rychlost na vstupu/výstupu
$c_{u1}/c_{u2}$	$[m \cdot s^{-1}]$	složka absolutní rychlostí na vstupu/výstupu
$P_1$	$[W]$	příkon odebíraný ze sítě
$m_f$	$[-]$	počet fází
$U_1$	$[V]$	napětí na fázi
$I_1$	$[A]$	proud na fázi
$\cos \varphi$	$[-]$	účinník
$P_\delta$	$[W]$	výkon procházející vzduchovou mezerou
$n_1$	$[min^{-1}]$	otáčky magnetického pole statoru
$M$	$[Nm]$	moment motoru
$\omega$	$[rad \cdot s^{-1}]$	úhlová rychlost magnetického pole statoru
$n$	$[min^{-1}]$	rychlost v otáčkách za minutu
$f$	$[Hz]$	kmitočet napájecího napětí
$p$	$[-]$	počet pólových dvojic
$s$	$[-]$	skluz
$n_2$	$[min^{-1}]$	otáčky magnetického pole rotoru
$\frac{dT}{dt}$	$[^{\circ}C \cdot s^{-1}]$	teplotní gradient
$q$	$[W \cdot m^{-2}]$	teplotní tok

$m$	$[kg]$	hmotnost
$c$	$[J \cdot K^{-1}]$	tepelná kapacita
$\kappa$	$[-]$	ochlazovací konstanta
$T_{sp}$	$[^{\circ}C]$	teplota vřetene
$T_o$	$[^{\circ}C]$	teplota okolí
$M_{sp}$	$[Nm]$	moment na vřetení
$RPM$	$[min^{-1}]$	otáčky vřetene
$\gamma$	$[^{\circ}C \cdot s^{-1}]$	teplotní gradient
$\beta_{1-3}$	$[-]$	neznámé koeficienty
$x_1$	$[Nm]$	zátěž vřetene
$x_2$	$[^{\circ}C]$	teplotní spád
$\gamma_m$	$[^{\circ}C \cdot s^{-1}]$	modelovaný teplotní gradient
$x_{2m}$	$[^{\circ}C]$	modelovaný teplotní spád
$T_m$	$[^{\circ}C]$	modelovaná teplota vřetene
$p_e$	$[\%]$	procentní chyba
$X_m$	$[^{\circ}C]$	modelovaná hodnota
$X_{exp}$	$[^{\circ}C]$	naměřená hodnota
$MSE$	$[-]$	střední kvadratická odchylka
$a$	$[-]$	počet měřených hodnot
pe_avg	$[\%]$	průměrná hodnota procentní chyby
pe_max	$[\%]$	maximální hodnota procentní chyby
BB 1/2	$[-]$	black box model, první polovina dat
GB 1/2	$[-]$	grey box model, první polovina dat
BB 2/2	$[-]$	black box model, druhá polovina dat
GB 2/2	$[-]$	grey box model, druhá polovina dat

## 9. Seznam příloh

Název souboru	Typ dokumentu	Popis dokumentu
BB_Chlapek	Soubor M	Skript s vytvořeným black box modelem pro první polovinu dat
BB_Chlapek_2	Soubor M	Skript s vytvořeným black box modelem pro druhou polovinu dat
GB_Chlapek	Soubor M	Skript s vytvořeným grey box modelem pro první polovinu dat
GB_Chlapek_2	Soubor M	Skript s vytvořeným grey box modelem pro druhou polovinu dat
Matice	Microsoft Access Table Shortcut	Soubor s naměřenými daty